

УДК 669.162.23; 621.1.016.4

Кошельник А.В. — к.т.н., доц., с.н.с. отдела водородной энергетики, Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАНУ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СЕКЦИОННЫХ РЕГЕНЕРАТИВНЫХ ТЕПЛООБМЕННИКАХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПЛАВИЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Представлены результаты моделирования работы регенеративных секционных теплообменников с неподвижной огнеупорной насадкой высокотемпературных плавильных комплексов с целью определения динамики изменения параметрических характеристик теплоносителей. Расчеты выполнены с использованием созданного автором программного комплекса, позволяющего моделировать тепловую работу теплообменных устройств данного типа. Получены данные о характере изменения температур холодного и горячего теплоносителей, огнеупорной насадки по высоте теплообменника во времени с учетом особенностей работы секционных регенераторов. Это позволит использовать полученные данные для разработки эффективных многоступенчатых схем утилизации теплового потенциала дымовых газов стекловаренных печей.

Ключевые слова: высокотемпературный плавильный комплекс, секционный регенератор, тепловой расчет, параметры теплоносителей.

Постановка задачи в общем виде

В настоящее время для большинства высокотемпературных теплотехнологических установок наиболее эффективным способом регенеративного внутреннего теплоиспользования является подогрев воздуха горения. Для топливных печей стекольной промышленности, черной металлургии и коксохимического производства технологически необходим высокотемпературный подогрев воздуха до температуры более 1000 С, который может быть достигнут в регенеративных теплообменниках (ТО) с неподвижной огнеупорной насадкой [1].

На предприятиях для промышленного производства больших объемов стекла (от 100 т/сутки и выше), реже для установок малой производительности, широко используются ваннные регенеративные печи с подковообразным и поперечным направлением пламени в варочной зоне. Современная регенеративная печь может иметь тепловую эффективность ниже 50 %, причем потери с дымовыми газами

составляют, как минимум, около 20 % [2, 3]. Температура продуктов горения на входе в насадочную камеру регенеративных воздухоподогревателей стекловаренных печей находится на уровне 1200 – 1400 °С, а на выходе из теплообменника колеблется в пределах 400 – 500 °С [4]. Такой температурный потенциал может быть использован для выработки тепловой энергии в утилизационных установках, дополнительно устанавливаемых за регенераторами. Однако для этого необходимо располагать сведениями о динамике изменения температуры рабочей среды за регенераторами в процессе нагрева насадки.

Анализ последних достижений и публикаций

Одним из основных критериев выбора теплоутилизационного оборудования является его предполагаемая эффективность, а также характер влияния его режимных параметров на основной рабочий процесс. Решающее значение имеет при этом достаточно надежное определение изменения условий эксплуатации и повышение стойкости основного оборудования, улучшение энергоэкологических показателей производства в целом при установке дополнительного оборудования. В настоящее время на стекольных заводах применяется широкая номенклатура традиционного теплоутилизационного оборудования, предназначенного, в основном, для использования теплового потенциала уходящих дымовых газов. К этому оборудованию относятся, прежде всего, рекуператоры, предназначенные для нагрева воздуха горения, реже используются водяные экономайзеры, котлы-утилизаторы, теплообменники для нагрева сырьевых материалов [2, 4]. Известны работы по разработке и внедрению многоступенчатых схем утилизации теплоты, позволяющих снизить температуру уходящих дымовых газов до 200 °С и получать температуру подогрева воздуха горения на уровне 1100 °С [5].

Постановка задачи

Для обеспечения заданного качества получаемой стекломассы необходимо поддерживать соответствующий температурный режим в каждой зоне печи. Так, в районе первой пары горелок допускаются колебания температуры ± 15 °С, в зоне максимальных температур ± 10 °С, в конце варочной части ± 5 °С, в зоне выработки ± 2 °С [6]. Работа же регенераторов характеризуется ярко выраженной периодичностью, что приводит к циклическому изменению температуры дымовых газов в течение цикла работы ТО.

Указанные особенности производства стеклоизделий обуславливают необходимость применения системного подхода к решению ряда взаимосвязанных задач в теплотехнологии производства стекломассы. Детального подхода требует и разработка системы оценки энергетиче-

ческого совершенства тепловых схем, выбор аппаратурного оформления технологического процесса в условиях использования научно-обоснованной информации об изменении режимных параметров в процессе эксплуатации. Таким образом, для обеспечения заданного температурного уровня при установке дополнительного теплообменного оборудования необходимо знать динамику изменения температуры теплоносителей во времени за цикл работы регенеративного теплообменника с учетом особенностей работы плавильных агрегатов.

Исследование тепловых процессов в регенеративных секционных теплообменниках

В данной работе с целью определения динамики изменения температуры воздуха и дымовых газов на выходе из насадки регенератора с секционной компоновкой использовался программный комплекс для моделирования регенеративных теплообменников с неподвижной огнеупорной насадкой, созданный автором на базе конечно-разностной математической модели нестационарных теплообменных процессов в теплоаккумулирующей камере теплообменника [4].

В стекловаренных печах ванного типа с поперечным направлением пламени используются секционные регенеративные теплообменники с неподвижной огнеупорной насадкой, которые располагаются вдоль боковых стен печи (рис. 1).

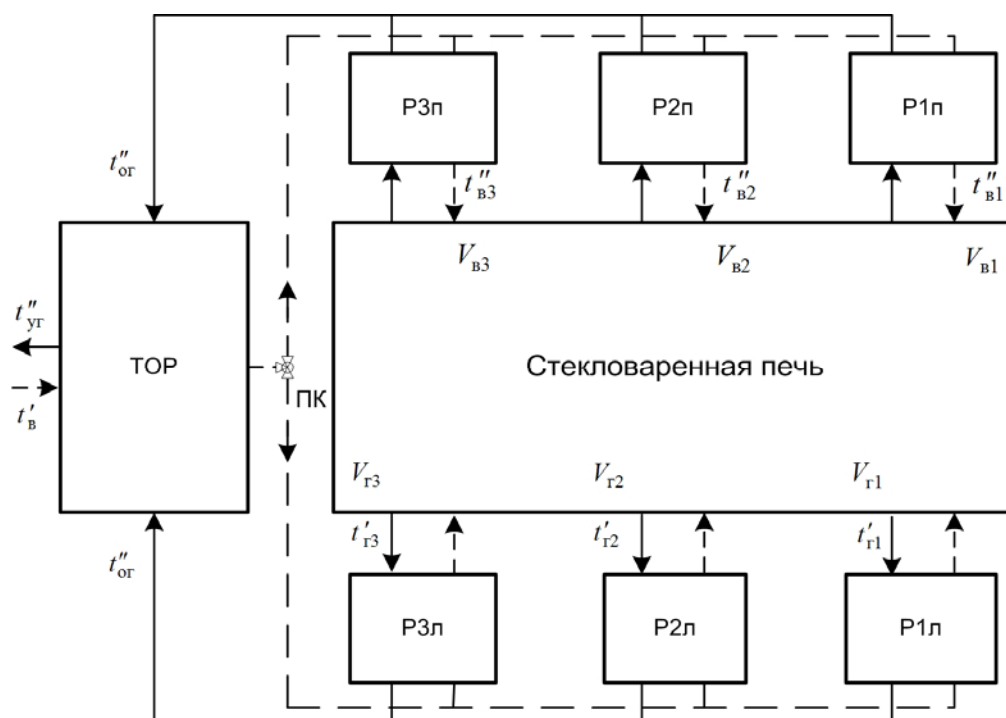


Рис. 1. Схема движения теплоносителей стекловаренной печи с поперечным направлением движения пламени и секционными регенераторами

На рис. 1 приняты следующие обозначения: Р1п (л) – Р3п (л) – секции регенеративных ТО, правые (левые); ТОР – теплообменник рекуперативный; ПК – перекидной клапан.

Тепловые нагрузки газовых горелок рассчитываются с учетом теплообмена не только между факелом, кладкой и стекломассой рассматриваемого участка, но и между соседними участками печи. Представленная схема движения теплоносителей стекловаренной печи с поперечным направлением пламени и секционными регенеративными теплообменниками характеризуется определенными условиями. Так, особенностью работы секционных регенеративных ТО является то, что расходы дымовых газов $V_{Г1} - V_{Г3}$, нагреваемого воздуха $V_{В1} - V_{В3}$, а также температура дымовых газов на входе $t'_Г$ и температура подогретого воздуха $t''_В$ для каждой секции могут иметь существенные различия. Это объясняется тем, что каждая секция обслуживает горелки, расположенные в различных зонах печи (варочной или студочной), имеющих соответствующий температурный режим.

В качестве объекта исследования выбрана плавильная печь для варки бесщелочного стекла, имеющая следующие характеристики: удельный съем стекломассы – $0,256 \text{ т}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$; топливо – природный газ с теплотой сгорания $Q_H^c = 35590 \text{ кДж}/\text{м}^3$; общий расход топлива на печь – $0,15 \text{ м}^3/\text{с}$; количество горелочных устройств – 3; тип регенеративных ТО – вертикальные секционные (3 секции).

В табл. 1 представлены данные теплового расчета для каждой секции регенеративного теплообменника с продолжительностью циклов нагрева и охлаждения – 30 мин.

Таблица 1

Основные показатели работы секционного регенеративного ТО

Параметры	Номер секции		
	1	2	3
Расход дымовых газов, $\text{м}^3/\text{с}$	0,688	0,749	0,616
Расход воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$	0,625	0,681	0,56
Температура дымовых газов на входе в ТО, $^{\circ}\text{C}$	1250	1290	1225
Температура воздуха на входе в ТО, $^{\circ}\text{C}$	50	50	50
Средняя температура дымовых газов за цикл $\bar{t}_Г$, $^{\circ}\text{C}$	551	579	525
Средняя температура нагреваемого воздуха за цикл $\bar{t}_В$, $^{\circ}\text{C}$	920	939	917
Максимальная температура дым. газов на выходе из ТО в конце цикла $t''_Г$, $^{\circ}\text{C}$	581	613	552
Минимальная температура воздуха на выходе из ТО в конце цикла $t'_В$, $^{\circ}\text{C}$	860	873	863

Расход дымовых газов при моделировании работы регенеративных ТО изменяется от 0,616 до 0,749 м³/с, расход подогреваемого воздуха – от 0,56 до 0,681 м³/с, температура дымовых газов колеблется от 1225 до 1290 °С для различных рабочих зон стекловаренной печи.

Для исследования выбрана насадка Лихте, которая имеет достаточно высокую удельную поверхность нагрева и характеризуется повышенной интенсивностью теплообмена. Характеристика насадки представлена в табл. 2.

Таблица 2

Характеристики теплоаккумулирующих элементов регенератора при использовании насадки Лихте

Ширина канала, мм	Размер кирпича, мм	Осевой размер, мм	Удельная поверхность нагрева, м ² /м ³	Свободное сечение для прохода газов, %	Удельный объем кирпича в 1 м ³ насадки, м ³ /м ³
120	300×150×65	185	18,9	53,9	0,46

Разбивка насадки на ярусы по огнеупорным зонам проведена по рекомендациям, приведенным в [7]. Длительность циклов нагрева и охлаждения насадки регенератора принята одинаковой и равной 30 мин, что соответствует реальным значениям работы промышленных агрегатов.

Результаты расчетного исследования тепловых режимов работы регенеративных ТО приведены на рис. 2, 3. На рис. 2 представлено полученное расчетным путем распределение температуры теплоаккумулирующих элементов насадки по высоте в конце периода нагрева. Следует отметить нелинейный характер распределения температуры в высокотемпературной зоне насадки регенератора.

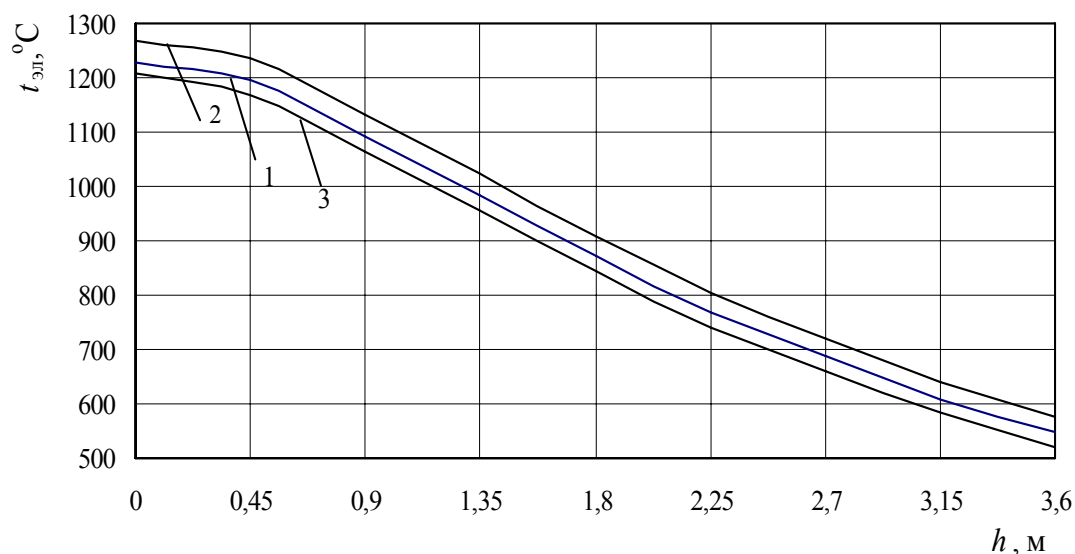


Рис. 2. Распределение температуры теплоаккумулирующих элементов регенератора по высоте в конце периода нагрева:
1 – первая секция; 2 – вторая секция; 3 – третья секция

На рис. 3 приведены расчетные данные, которые показывают диапазон и характер изменения температуры дымовых газов и нагреваемого воздуха на выходе из секций регенераторов во времени. Неравномерность расхода топлива и температуры дымовых газов на входе в регенератор обуславливает, соответственно, различные значения температур теплоносителей для каждой секции теплообменника.

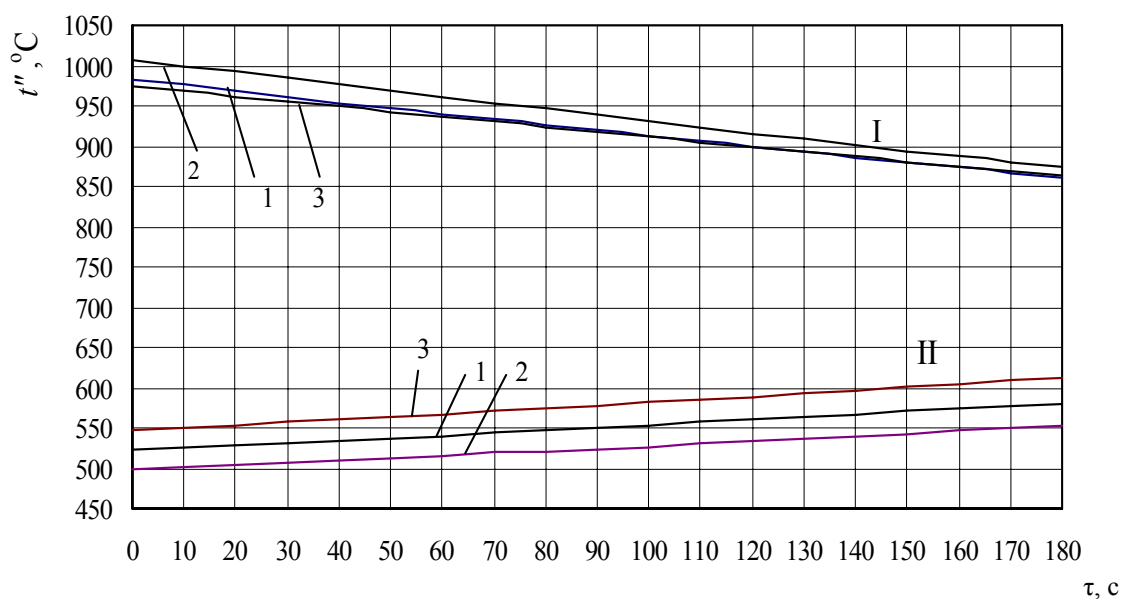


Рис. 3. Изменение температуры воздуха (I) и дымовых газов (II) на выходе из секционного регенератора во времени:
1 – первая секция; 2 – вторая секция; 3 – третья секция

Так, средняя температура нагрева воздуха меняется от 917 до 939 °C в различных секциях регенератора, средняя температура дымовых газов составляет 525, 551 и 579 °C соответственно.

Полученные данные позволили определить динамику изменения температуры огнеупоров и теплоносителей по высоте и на выходе из насадки вертикальных секционных регенеративных ТО для ванной стекловаренной печи с поперечным направлением движения пламени.

Выводы

Разработанный программный комплекс позволяет моделировать тепловые режимы работы секционных регенеративных теплообменников плавильных печей стекольного производства с учетом характерных особенностей их работы. Особенность разработанной математической модели и программного комплекса заключается в возможности моделирования работы секционных регенераторов с различным числом секций и типом насадок. Программный продукт возможно использовать при разработке многоступенчатых систем утилизации теп-

лоты отходящих дымовых газов применительно к высокотемпературным промышленным теплотехнологическим комплексам по производству стекломассы.

Список литературы

1. Высокотемпературные теплотехнологические процессы и установки / [И. И. Перелетов, Л. А. Бровкин, Ю. И. Розенгарт и др.]. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 336 с.
2. Грес Л. П. Высокоэффективный нагрев доменного дутья : монография / Л. П. Грес. – Днепропетровск : Пороги, 2008. – 492 с.
3. Кошельник А. В. Особенности режимов отопления и работы воздухонагревателей доменных печей при замене природного газа искусственным газообразным топливом / А. В. Кошельник, В. М. Кошельник, П. Д. Давыденко // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2007. – № 8. – С. 18–22.
4. Интегрированные энергосберегающие теплотехнологии в стекольном производстве: монография / [Л. Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ, В. М. Кошельник, В. В. Соловей, А. В. Кошельник]. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2008. – 628 с.
5. Baier B. Abwaermenutzung durch Stromerzeugung hinter regenerativ betriebenen Behaelterglasschmelzwannen / B. Baier // Glastechnische Berichte. – 1979. – № 9. – S. 192–196.
6. Строительные материалы: справочник / [Болдырев А. С., Золотов П. П., Люсов А. Н. и др.]. – М. : Стройиздат, 1989. – 567 с.
7. Кошельник О. В. Вибір ефективних конструктивних і експлуатаційних параметрів регенеративних теплообмінників скловарних печей ванного типу / О. В. Кошельник // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2008. – № 6. – С. 17–23.

Рукопись поступила 29.01.2010 г.